

可提高太阳模拟器均匀性的变形椭球面聚光镜

吕 涛^{1,2} 张景旭¹ 付东辉¹ 陈小云¹ 刘 杰¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 辐照面的均匀性是太阳模拟器的重要指标。椭球面聚光镜是太阳模拟器的重要组成部分,它能够将光源发出的光能收集并会聚在第二焦面上,并在第二焦面上形成中间强边缘弱的高斯能量分布,该能量分布直接影响辐照面的均匀性。从椭球面方程泰勒展开后得到的高阶方程中演变得到了一种变形的椭球面,这种变形椭球面聚光镜能够改善第二焦面上的能量分布,使第二焦面上光能量的强弱对比减弱,从而提高太阳模拟器辐照面的均匀性。将某项目中的椭球面聚光镜进行了变形,并在 Matlab 中进行了数值计算,获得了变形椭球面曲线,最后通过 LightTools 仿真分析证明该变形椭球面聚光镜有利于第二焦面上能量分布均匀性的提高。

关键词 光学设计;太阳模拟器;均匀性;椭球面聚光镜;变形系数

中图分类号 TH741; V416.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1223001

A Deformed Ellipsoid Condenser Beneficial to the Uniformity of the Solar Simulator

Lü Tao^{1,2} Zhang Jingxu¹ Fu Donghui¹ Chen Xiaoyun¹ Liu Jie¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Uniformity is an important index of the solar simulator, and the ellipsoid condenser plays an important role in solar simulator. Light energy emitted from the light source can be collected and aggregated on the second focal plane, and Gaussian energy distribution is formed by using the ellipsoid condenser. The uniformity of the irradiated surface is directly determined by the distribution. A deformed ellipsoid condenser is obtained through ellipsoid equation Taylor expansion. The surface of the condenser can be deformed by 3 coefficients. The energy distribution on the second focal plane can be improved by the deformed ellipsoid condenser, and the uniformity of the solar simulator can be enhanced because of the weakened light energy contrast. An ellipsoid condenser used in a project is deformed and the deformed ellipsoid curve is obtained by using Matlab. The uniformity improvement on the second focal plane is proved by the simulation results of LightTools.

Key words optical design; solar simulator; uniformity; ellipsoid condenser; deformation coefficient

OCIS codes 230.1150; 120.4570; 120.2130; 120.5700

1 引 言

太阳模拟器是空间环境模拟的重要组成部分,可用于人造卫星的外空间环境热平衡实验、太阳电池的光电转换实验以及太阳电池在阳光辐照下的性

能衰减实验等。近年来随着科技的发展,太阳模拟器也被广泛应用于卫星姿态控制的太阳敏感器标定、卫星表面涂层光谱特性测试、遥感技术中地物目标的光谱辐射特性测试和控制农作物光照条件的实

收稿日期: 2013-04-17; **收到修改稿日期**: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61203242)

作者简介: 吕 涛(1984—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事空间环境目标模拟光学设备和空间光学仪器等方面的研究。E-mail: lvtao1984@gmail.com

导师简介: 张景旭(1964—),男,硕士,研究员,博士生导师,主要从事大口径望远镜和精密光学机械仪器等方面的研究。E-mail: zhangjingxu@ciomp.ac.cn

验等领域^[1-8]。

辐照强度、辐照均匀性、辐照稳定性和光谱匹配等是太阳模拟器的重要技术指标^[7]。聚光镜第二焦面内辐照分布不仅是评价聚光镜光学设计、合理确定积分器光通道数目的依据,而且是系统均匀性和辐照度的重要数据^[9]。椭球面聚光镜是一种反射式的聚光系统,能够将位于第一焦点的理想点光源发出的光能量收集并会聚到第二焦点上,参数设计合理的椭球面可以获得极高的能量利用率,因此在均匀照明系统^[10]尤其是太阳模拟系统中常常采用椭球面聚光镜。

太阳模拟器系统中,位于椭球面第一焦点附近的氙灯氙弧发出的光能量,经椭球面聚光镜反射并以给定的包容角会聚到椭球面的第二焦面上,形成一个较大范围的辐照分布。该辐照分布被位于第二焦面上的积分器场镜组中的若干小元素透镜对称分割,由于每个小元素透镜内的辐照分布较第二焦面上的辐照分布均匀性提高,这个“均匀”小元素透镜被积分器投影镜组对应的小元素透镜投影成像于无穷远处,形成一个叠加的均匀辐照面。因此椭球面聚光镜第二焦面上的辐照均匀性决定着系统的辐照均匀性^[11]。

为改善第二焦面上的辐照均匀性,一般会采用第二焦面离焦的方式^[12]。由于第二焦面离焦后能量发散,该方法会导致光学积分器接收的能量减少以及后续光学元件尺寸增大。也有人提出在椭球面方程 $y^2 = ax + bx^2$ 中加入 x 的其他幂次项,使方程变为高次方程即 $y^2 = ax + bx^{3/2} + cx^2 + dx^{5/2} + \dots$ 的形式^[1]。此方法原理可行但是操作性较差,难以确定高次方程的项数和系数。还有研究人员提出一种锥轴椭球面聚光镜^[13],它是将椭球面的光轴以第一焦点为支点旋转某个角度,随轴线偏转的椭球面的一半再绕原光轴回转一周而获得的。该方法形成的椭球面聚光镜可以在第二焦面上获得比较均匀的能量分布,但是其加工过程复杂。

本文提出并设计了一种变形椭球面聚光镜(已申请专利),该聚光镜的面型可以通过三个变形系数进行控制,合理的变形系数可以使得第二焦面上的辐照均匀性大幅改善。

2 变形椭球面的设计原理

标准椭球面的面型方程为

$$y^2 = 2rx - (1 - e^2)x^2, \quad (1)$$

式中

$$r = \frac{2f_1f_2}{f_2 + f_1}, \quad e = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1},$$

其中, f_1 为椭球面的第一焦距, f_2 为椭球面的第二焦距。

将椭球面方程泰勒展开后得到

$$x = \frac{1}{2r}y^2 - \frac{1}{8r^3}ty^4 + \frac{1}{16r^5}t^2y^6 + \dots + \frac{1}{n!} \left[\prod_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1}{2} - i \right) \right] \frac{1}{r^{2n-1}} t^{n-1} y^{2n}, \quad (2)$$

式中 $t = -(1 - e^2)$ 。

由(2)式可知,椭球面的面型主要由低阶量决定,高阶量对面型影响较小,选取前三阶并给定相应的系数将(2)式变形为

$$x = \frac{a}{2r}y^2 - \frac{b}{8r^3}ty^4 + \frac{c}{16r^5}t^2y^6,$$

式中 a , b 和 c 称为变形系数,适当修正 a , b 和 c 的值便可得到变形的椭球面面型。当 $a = b = c = 1$ 时,变形椭球面的面型与标准椭球面面型是一样的(忽略高阶小量)。

3 第二焦面能量分布

为便于分析比较标准椭球面和变形椭球面的不同,本文给定了某项目中用到的椭球面参数: $f_1 = 57.35 \text{ mm}$, $f_2 = 1319.05 \text{ mm}$ 。

3.1 标准椭球面第二焦面能量分布

根据给定参数得标准椭球面方程为

$$y^2 = 219.84167x - 0.15972x^2.$$

在太阳模拟器系统中一般采用高压短弧氙灯作为光源,并将氙弧的阴极斑(亮度峰值点)调节至椭球面的第一焦点。采用 3 kW 氙灯作为光源,极间距为 6 mm。由于将氙灯简化为柱形光源则计算模型复杂,因此将氙弧简化为位于椭球面第一焦点且具有一定高度 $h = 3 \text{ mm}$ (总高度为 6 mm)的线性光源,分析模型如图 1 所示。

图 1 中 u_0 和 u_{h0} 分别为轴上发光点和轴外高度为 h 的发光点对应的后开口孔径角, u_m 和 u_{hm} 分别为轴上发光点和轴外高度为 h 的发光点对应的前开口孔径角, u_h 为轴外高度为 h 的发光点出射的光束 B 对应的孔径角,光束 A 和 C 分别为后开口和前开口出射的光束。在 Matlab 软件中建立数值计算模型。图 2 为不同高度的发光点随着孔径角的变化在第二焦面上得到的纵坐标值,图 3 为第二焦面上光斑的形状(1/4 圆斑)。

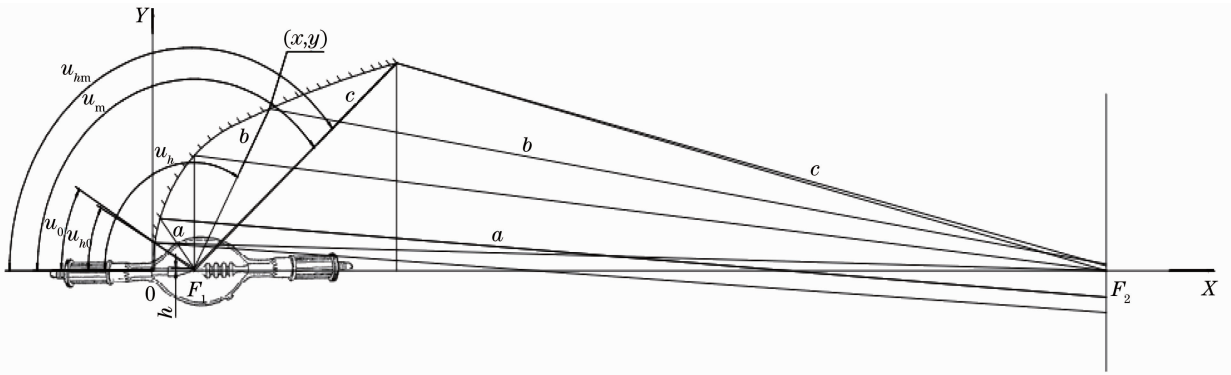


图 1 椭球面聚光镜分析模型

Fig. 1 Analysis model of the ellipsoid condenser

线做稍许的下压而大孔径角对应的椭球面曲线做向上的抬升。给定变形系数 $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ ，得到变形椭球面与标准椭球面的比较如图 4 所示。

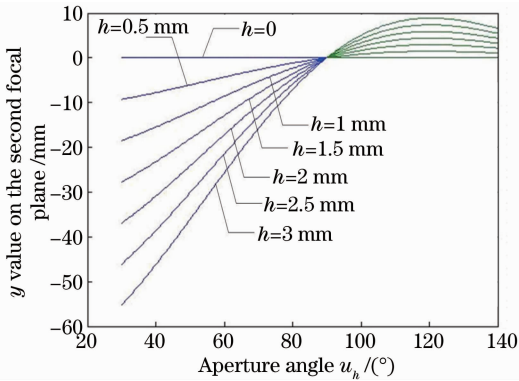


图 2 第二焦面上纵坐标值

Fig. 2 y values on the second focal plane

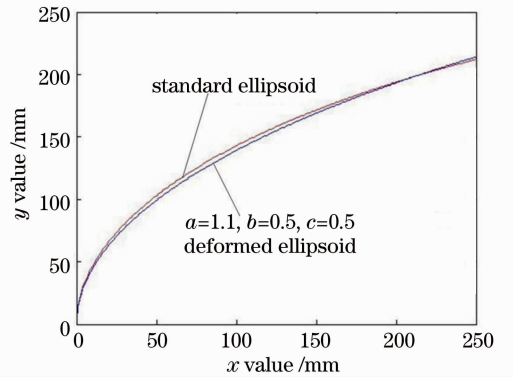


图 4 标准椭球面与 $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ 的变形椭球面的比较

Fig. 4 Comparison between standard ellipsoid curve and $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ deformed ellipsoid curve

由图 4 可知，变形后的椭球面与标准椭球面相比在小孔径角时曲线靠下而在大孔径角时曲线靠上。图 5 为不同发光点发出的光束随着椭球面聚光

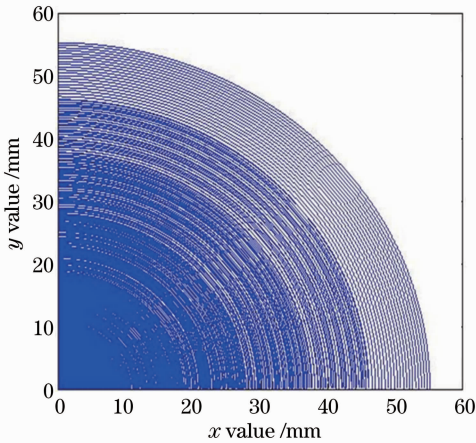


图 3 第二焦面上能量分布

Fig. 3 Energy distribution on the second focal plane

分析图 2 和图 3 可知：1) 第二焦面上的光斑分布在约 $\Phi 110$ mm 的范围内且中心能量极高；2) 小孔径角时，经椭球面反射的光线在第二焦面上的半径较大；3) 大孔径角时，经椭球面反射的光线在第二焦面上的半径较小。

3.2 变形椭球面第二焦面能量分布

针对标准椭球面聚光的特点，为提高第二焦面上的能量分布均匀性，需要将小孔径角对应的椭球面曲

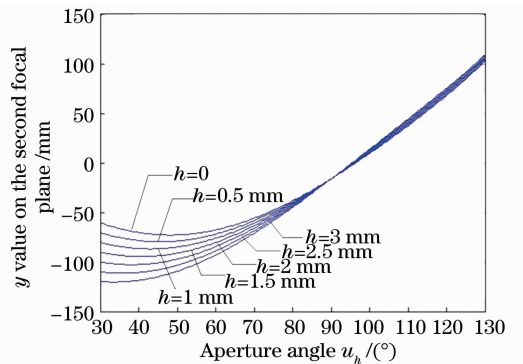


图 5 $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ 的变形椭球面第二焦面上纵坐标值

Fig. 5 Vertical coordinate values on the second focal plane of $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ deformed ellipsoid

镜孔径角的不同在第二焦面上得到的纵坐标值。

由图 5 可知轴上的发光点在第二焦面上不再会聚到近轴焦点而是形成了圆斑,同时大孔径角时的出射光束在第二焦面上形成的纵坐标值也变大了,因此变形椭球面第二焦面上光能量分布比标准椭球面聚光镜的均匀性高。图 6 为第二焦面上的能量分布,其更加直观地显示出能量分布的均匀性。图 7 和图 8 分别为变形系数 $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ 的变形椭球面面型和第二焦面上的能量分布。

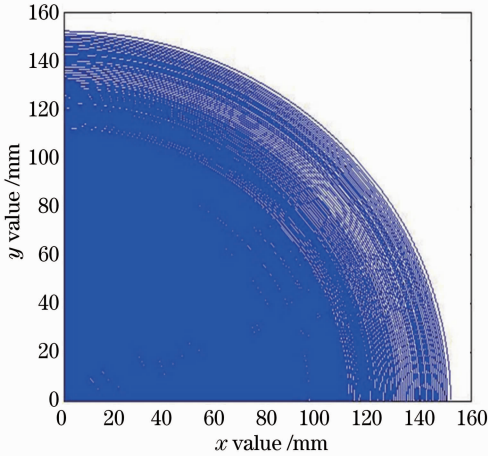


图 6 $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ 的变形椭球面第二焦面上能量分布

Fig. 6 Energy distribution on the second focal plane of $a=1.1, b=0.5, c=0.5$ deformed ellipsoid

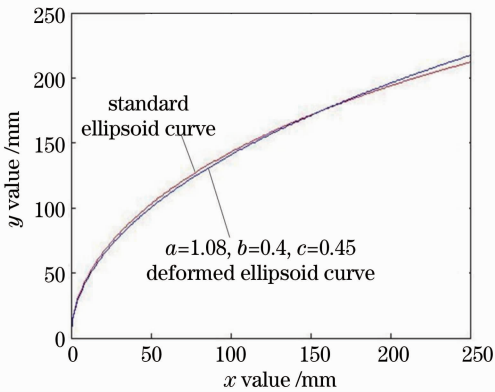


图 7 标准椭球面与 $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ 的变形椭球面的比较

Fig. 7 Comparison between standard ellipsoid curve and $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ deformed ellipsoid curve

4 仿真分析

本文设计采用的非球面面型方程为高次方程,其模型的建立在 PRO/E 中完成。利用 PRO/E 自

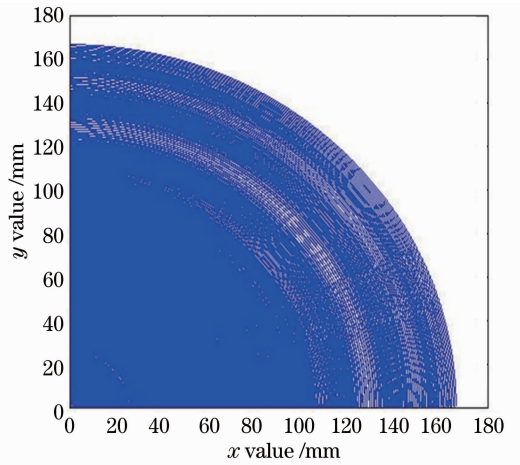


图 8 $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ 的变形椭球面第二焦面上能量分布

Fig. 8 Energy distribution on the second focal plane of $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ deformed ellipsoid

带的方程编辑器可以完成要求的曲线,进而可以建立聚光镜的三维模型。LightTools 是一款功能强大的照明分析软件,其利用蒙特卡罗法进行光线追迹可以比较真实地反映光学系统的照度变化。将在 PRO/E 中建立的实体模型导入 LightTools 中并导入氙灯光源模型,获得的仿真分析模型如图 9 所示。

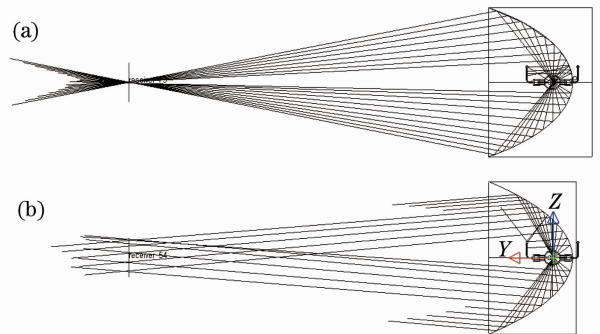


图 9 仿真分析模型。(a) 标准椭球面; (b) $a=1.08, b=0.4, c=0.45$

Fig. 9 Simulation analysis model. (a) Standard ellipsoid; (b) $a=1.08, b=0.4, c=0.45$

第二焦面即接收面大小为 $\Phi 110 \text{ mm}$,划分网格数为 20×20 (避免自动模式导致的不一致性),标准椭球面的接收器代号为 receiver_79,而变形椭球面的接收器代号为 receiver_54。图 10 和图 11 分别为第二焦面上能量分布的曲线图和等值线云图,可知采用变形椭球面聚光镜后第二焦面上的光能量分布均匀性确实要优于标准椭球面聚光镜。

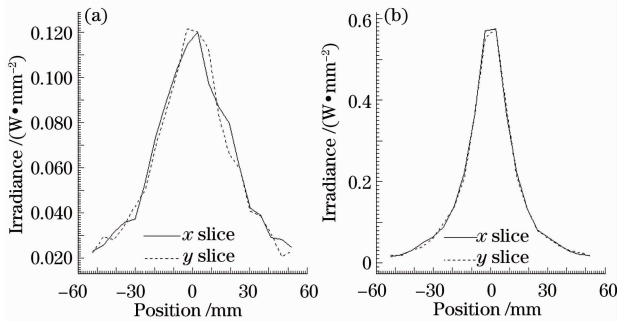


图 10 第二焦面上能量分布曲线图。(a)标准椭球面；
(b) $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ 的变形椭球面
Fig.10 Energy distribution curves on the second focal plane. (a) Standard ellipsoid; (b) $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ deformed ellipsoid

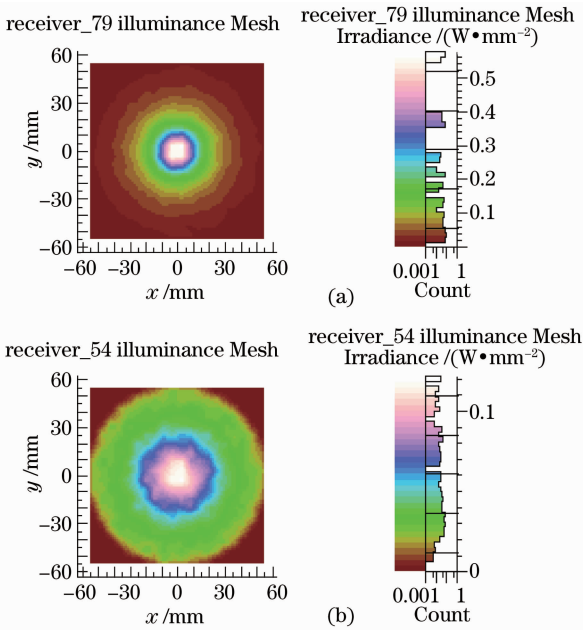


图 11 第二焦面上能量分布光栅图。(a)标准椭球面；
(b) $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ 的变形椭球面
Fig.11 Energy distribution raster chart. (a) Standard ellipsoid; (b) $a=1.08, b=0.4, c=0.45$ deformed ellipsoid

5 结 论

提出并设计了一种变形椭球面聚光镜,该聚光镜的面型可以通过三个变形系数进行控制,合理地选择这三个变形系数即可大幅提高椭球面第二焦面上的能量分布均匀性,进而提高太阳模拟器辐照面上的均匀性。设计的变形椭球面聚光镜具有设计简单、操作性强的特点。仿真分析结果表明,该变形椭球面聚光镜可以显著改进第二焦面上能量分布的均匀性。

参 考 文 献

- Liu Hongbo. Solar simulator technique [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(2): 177-181.
- 刘洪波. 太阳模拟技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 177-181.
- Liu Feng, Xu Lin, Peng Xiaojing, et al.. Optimal design of the illuminance uniformity of solar simulator based on artificial neural network [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(9): 1177-1181.
- 刘峰, 徐林, 彭小静, 等. 基于神经网络算法的太阳模拟器光均匀性优化设计[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1177-1181.
- Wang Zhiming, Gong Zhenbang, Wei Guangpu, et al.. Solar simulation technique for solar cell measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1542-1547.
- 王志明, 龚振邦, 魏光谱, 等. 用于太阳能电池测试的太阳模拟器技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1542-1547.
- Wang Yuan, Zhang Linhua. Design of a new type of full-spectrum solar simulator [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(11): 1132-1136.
- 王元, 张林华. 一种新型全光谱太阳模拟器设计[J]. 太阳能学报, 2006, 27(11): 1132-1136.
- Zhang Guoyu, Lü Wenhua, He Xiaolei, et al.. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator [J]. Chinese Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 41-45.
- 张国玉, 吕文华, 贺晓雷, 等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 41-45.
- Fu Donghui. Application and research of rectangle optical integrators in solar simulator [J]. OME Information, 2011, 28(12): 70-72.
- 付东辉. 太阳模拟器中长方形光学积分器的应用与研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(12): 70-72.
- Su Shi, Zhang Guoyu, Fu Yun, et al.. New development of solar simulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070003.
- 苏拾, 张国玉, 付芸, 等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070003.
- Yu Rongjin. Optics and solar energy [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1751-1755.
- 于荣金. 光学与太阳能[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1751-1755.
- IEC60904-9, Solar Simulator Performance Requirements [S].
- IEC60904-9, 太阳模拟器性能要求[S].
- Ding Yi, Gu Peifu. Free form reflector for uniform illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544.
- 丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540-544.
- Zhao Jilin, Zhong Jigong, Chen Xing. TM-3000A1 solar simulator [J]. Optics and Precision Engineering, 1981, 3: 49-56.
- 赵吉林, 仲跻功, 陈兴. TM-3000A1 太阳模拟器[J]. 光学机械, 1981, 3: 49-56.
- Zhong Jigong. The several question of the solar simulator optics system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1983, 4(3): 187-193.
- 仲跻功. 太阳模拟器光学系统的几个问题[J]. 太阳能学报, 1983, 4(3): 187-193.
- Shenyang HB Optical Techology. The cone axis ellipsoidal reflector [OL] <http://www.hb-optical.com.cn/products/reflectors/conf.html>.

栏目编辑: 张 腾